

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра інформаційної безпеки

«На правах рукопису»

УДК 004.932

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ М.В.Грайворонський

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності: 113 Прикладна математика

на тему: Радіометричне та просторове калібрування цифрових зображень за довільними об'єктами

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ФІ-71мп
(шифр групи)

Боронов Кирило Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник к.ф.-м.н., доц. Смирнов Сергій Анатолійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра інформаційної безпеки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
Спеціальність (спеціалізація) – 113 Прикладна математика («Математичні методи комп'ютерного моделювання»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ М.В.Грайворонський
(підпис)

« ____ » _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Боронову Кирилу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Радіометричне та просторове калібрування цифрових зображень за довільними об'єктами

науковий керівник дисертації к.ф.-м.н., доц. Смирнов Сергій Анатолійович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «15» листопада 2018 р. № 4171-с

2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2018 р.

3. Об'єкт дослідження _____

4. Вихідні дані _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи 51 сторінка, 10 ілюстрацій, 1 таблиця, 2 додатки, 12 джерел літератури.

Об'єктом дослідження є попередня обробка цифрових дистанційних зображень.

Предметом дослідження прив'язка цифрових зображень до радіометричної та просторової шкал для покращення якості даних.

Методи дослідження базуються на переході від неперервної моделі зображення до дискретної, застосуванні математичного апарату, який використовує властивість дискретності, створенні алгоритмів для розроблюваних методів та проведенні імітаційних експериментів із застосуванням спеціального програмного забезпечення та середовищ програмування.

Результатом роботи є розроблений метод радіометричного та просторового калібрування зображень, який на відміну від існуючих методів не залежить від геометричної форми об'єкта прив'язки, але при цьому володіє субпіксельною точністю.

Дослідження може бути продовжене в напрямку розробки алгоритмів автоматизації виявлення підходящих об'єктів для калібрування на більш складних зображеннях.

ПРОСТОРОВИЙ, ПРИВ'ЯЗКА, КАЛІБРУВАННЯ, РАДІОМЕТРИЧНИЙ, СУБПІКСЕЛЬНИЙ, ЦИФРОВЕ ЗОБРАЖЕННЯ, ЦЕНТР МАС, ЯСКРАВІСТЬ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

ABSTRACT

Work volume is 51 pages, 10 illustrations, 1 table, 2 appendices, 12 literature sources.

The research object is coarse processing of digital remote images.

The research subject is sub-pixel reference of digital images to radiometric and spatial scales.

The research methods are based on the transition from a continuous image model to a discrete one, the application of a mathematical apparatus that uses the discrete property, the creation of algorithms for the methods being developed, and conducting of simulation experiments using special software and programming environments.

The result of this work is the developed method of radiometric and spatial image calibration, which, unlike existing methods, does not depend on the geometric shape of the reference object, but at the same time possesses the sub-pixel accuracy.

The study can be continued in the direction of developing algorithms for automating the detection of suitable objects for reference of more complex images.

SPATIAL, REFERENCE, CALIBRATION, RADIOMETRIC, SUB-PIXEL,
DIGITAL IMAGE, MASS CENTER, BRIGHTNESS, REMOTE EARTH PROBING

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	7
Вступ.....	8
1 Загальні відомості про задачі та методи прив'язки зображень	11
1.1 Фотометричні величини та одиниці вимірювання	11
1.2 Принципи формування та прив'язки зображень	14
1.3 Прив'язка за орбітальними даними.....	16
1.4 Прив'язка за мапами	19
1.5 Прив'язка за зорями	20
1.6 Прив'язка за наземними орієнтирами.....	21
1.7 Детектори кутів	22
Висновки до розділу 1	30
2 Математичні аспекти прив'язки	31
2.1 Методи корекції яскравості зображень.....	31
2.2 Форми об'єктів прив'язки	33
2.3 Параметризація границь об'єкта	34
2.4 Метод центру мас та його модифікації.....	35
Висновки до розділу 2	40
3 Опис та реалізація калібрувальної моделі	41
3.1 Тестові об'єкти	41
3.2 Реалізація алгоритму.....	43
3.3 Опис результатів	45
Висновки до розділу 3	46
Висновки	47
Перелік джерел посилань	48
Додаток А.....	49
Додаток Б	50

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

АЧТ	-	абсолютно чорне тіло
ГЛОНАСС	-	глобальна навігаційна супутникова система
ДЗЗ	-	дистанційне зондування Землі
кд	-	кандела
км	-	кілометр
лк	-	люкс
м	-	метр
мм	-	міліметр
ОТ	-	особлива точка
ОТМ	-	опорна точка місцевості
СК	-	система координат
см	-	сантиметр
ЦМ	-	центр мас
GPS	-	Global Position System (система глобального позиціювання)

ВСТУП

Обробка зображень застосовується в багатьох сферах людської діяльності. З початком розвитку вона мала форму редагування, тобто зміни певних властивостей зображення. Але з урізноманітненням задач з'явилася потреба не лише в методах редагування, а й обробки з метою отримання певної інформації про зображення чи об'єкти, які на ньому містяться.

Ще в середині XX століття обробка зображень була аналоговою та проводилася спеціальними оптичними пристроями. З появою та розвитком обчислювальної техніки з'явилася можливість переходити від аналогової до цифрової форми зображень та проводити обробку відповідними методами, хоча аналогова обробка досі тримає позиції в деяких напрямках (наприклад, голографія). Цифрова обробка охоплює великий спектр можливостей як обробки для відтворення (геометричні перетворення, корекція, згладжування, комбінування зображень, сегментація тощо), так і в прикладних та наукових цілях (розпізнавання тексту, обробка даних ДЗЗ, медична діагностика, ідентифікація особистості, визначення форми та переміщення об'єкта тощо). Різноманіття сфер застосування цифрової обробки стрімко зростає, як і складність завдань та вимоги до точності.

Актуальність роботи. Для багатьох задач зображення є проміжними даними. Прив'язка як завдання встановлення чи пошуку відповідності зображень є однією з задач обробки, які покликані покращити якість та точність зображень як даних. Особливо актуально це для тих задач, які засновані на застосуванні аерокосмічних знімків земної поверхні. Роздільна здатність та світлочутливість супутникових камер постійно покращується. Але все одно спотворень знімку під час його створення чи передавання на Землю часто не уникнути. Це може бути спричинене специфікою рельєфу, обертанням Землі, апаратними похибками, недоліками геометрії сенсорів і т.д. Через це знімки потребують калібрування. Воно виконується з точки зору простору - порівнянням реальних відстаней між точками поверхні, які були обрані вузлами калібрувальної сітки, та цих самих

відстаней на знімку, а з точки зору радіометрії - порівнянням реальних (фізичних) шкал фотометричних величин та їх відображення у цифрову шкалу яскравості. Калібрувальний вузол, в ідеальному сенсі, є точкою, але в загальному випадку точність, з якою ми можемо задати характеристики цієї точки (тобто виконати прив'язку), обмежується розмірами пікселя та різницею найближчих дискретних рівнів яскравості. Така точність може бути незадовільною, оскільки в залежності від параметрів зйомки піксель може охоплювати і декілька метрів, і декілька сотень метрів, як при космічній зйомці, а цифрова шкала яскравості - не бути достатньо глибокою, щоб коректно відобразити зміни неперервної фізичної шкали. Тому один з важливих напрямів розвитку цієї сфери - обробка та прив'язка зображень із субпіксельною точністю, тобто з такою, що перевищує параметричні межі одного пікселя.

Метою даної роботи є розробка моделей та методів калібрування зображень, що є універсальними відносно геометричної форми об'єктів на зображенні, за якими відбувається прив'язка, з досягненням субпіксельної точності.

Завданнями дослідження є аналіз існуючих задач та методів прив'язки, дослідження можливостей систем моделювання, розширення методів, застосування їх на підготовленій вибірці тестових об'єктів.

Об'єктом дослідження є попередня обробка цифрових дистанційних зображень.

Предметом дослідження є прив'язка цифрових зображень до просторової та радіометричної шкал із субпіксельною точністю для покращення якості даних.

Методи досліджень. В основі досліджень лежить перехід від неперервної моделі зображення до дискретної, застосування математичного апарату, який використовує властивість дискретності, створення алгоритмів для розроблюваного методу та проведення імітаційних експериментів з підготовленими тестовими об'єктами із застосуванням спеціального програмного забезпечення та середовищ програмування.

Наукова новизна полягає в розробці методу калібрування, що є універсальним відносно геометричної форми об'єктів прив'язки та має

субпіксельну точність відносно абсолютної просторової шкали та шкали яскравості.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження дозволяють проводити калібрування аерофотознімків за довільними об'єктами, яким достатньо мати незмінну форму, відомі геометричні параметри та спектральні властивості поверхні, в умовах відсутності в Україні спеціальних калібрувальних полігонів.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАДАЧІ ТА МЕТОДИ ПРИВ'ЯЗКИ ЗОБРАЖЕНЬ

1.1 Фотометричні величини та одиниці вимірювання

У 1901 році Макс Планк постулював, що енергія може поглинатися чи випромінюватися АЧТ тільки деякими дискретними порціями, які він назвав квантами. Він припустив, що енергія E , що передається квантами, визначається так:

$$E = \hbar f , \quad (1.1)$$

де \hbar - стала Планка, а f - частота випромінювання.

Ейнштейн у 1907 році розширив цю концепцію до ствердження того, що енергія в будь-якій системі передається дискретними порціями. Він також дав квантам світла найменування "фотони".

Здавалося б, що для вимірювань та спостережень достатньо та доцільно використовувати вирази, подібні наведеному вище. Однак ситуація є складнішою насправді, оскільки людське око, подібно вуху, має нерівномірну спектральну чутливість. Так, наприклад, світло від аргонного лазера (зелене) буде здаватися яскравіше, ніж світло неонові газорозрядної лампи (червоне) тієї ж інтенсивності. Тому порівняння інтенсивності має сенс тільки в тому випадку, якщо його проводять у вузькому спектральному діапазоні.

Історично фотометрія базується на стандартах, що передбачають певно визначене джерело світла. Спектральні особливості джерела не беруться до уваги, і просто припускається, що він рівномірно випромінює у всьому видимому діапазоні спектра. Виходячи з цих історичних методів, у області фотометрії в системі СІ були розроблені визначення та одиниці, наведені нижче.

Сила світла (I) - кандела (кд)

Кандела - це сила світла, що випромінюється в перпендикулярному напрямі поверхнею тонкого випромінювача у вигляді АЧТ. Визначено, що цей

випромінювач має площу поверхні $\frac{1}{6} \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ і знаходиться при температурі тверднення платини при тиску $101\,325 \text{ Н/м}^2$ (це відповідає температурі 2045 К).

Світловий потік (φ) - люмен (лм)

Потік світла від гіпотетичного точкового джерела називається ізотропним, тобто він випромінює світло рівномірно в усіх напрямках. Хоча реальні джерела світла не є ізотропними випромінювачами в загальному випадку. Кількість світла, що випромінюється в заданому напрямі в певний тілесний кут, називається світловим потоком. Люмен - це світловий потік, що випромінюється певним точковим джерелом із силою світла 1 кд всередині конуса з тілесним кутом 1 стерадіан (Ω):

$$\varphi = \int I d\Omega \text{ [лм]} \quad (1.2)$$

В загальному випадку для ізотропного точкового джерела цей вираз визначав би повний потік як

$$\Phi_{\text{повн}} = 4\pi I \text{ [лм]} \quad (1.3)$$

Освітленість - люкс (лк)

Це кількість світла, що падає на поверхню. 1 люкс - це освітленість, що створюється світловим потоком в 1 люмен, який падає на поверхню площею в 1 квадратний метр, тобто $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$. Типові значення освітленості, рекомендовані для освітлювального обладнання, лежать в межах від 500 - 600 для офісів і до 100 лк для вхідних під'їздів при вимірюванні в горизонтальній площині на рівні 1 м від підлоги.

Яскравість (кд/м^2)

Блиск чи сяяння поверхні, самосвітної чи освітленої, називається яскравістю, і є силою світла, що випускається з одиниці площі.

Дослідники в різних областях оптоелектроніки намагаються не посилалися на фотометричні одиниці СІ через незручності, пов'язані з необхідністю мати стандартні джерела випромінювання та фотоприймачі зі стандартним спектральним відгуком. Окрім того, оскільки більшість оптичних досліджень проводяться у вузьких спектральних діапазонах і часто в невидимих областях спектра, використання стандартних фотометричних величин не є доцільним. Тому дослідники, що працюють в деякій вузькій смузі довжин хвиль, будуть просто вимірювати вихідний електричний сигнал фотоприймача. Потім, знаючи площу світлочутливої поверхні та ефективність приймача на цих довжинах хвиль, можна визначити інтенсивність світла у Вт/м².

Дослідники зазвичай використовують такі одиниці, що базуються на см² у якості одиниці площі.

Енергетична спектральна інтенсивність джерела $S(\lambda)$

Це потужність, що випромінюється з одиничної площі джерела в діапазоні довжин хвиль від λ до $\lambda + \Delta\lambda$ в конусі одиничного тілесного кута. На практиці для $S(\lambda)$ зазвичай використовують одиниці Вт/(см²·мкм·стер).

Яскравість B

Це повна потужність, що випромінюється джерелом на всіх довжинах хвиль з одиничної площі джерела в конусі одиничного тілесного кута:

$$B = \int_0^\infty S(\lambda) d\lambda \quad [\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{стер})] \quad (1.4)$$

Потік випромінювання R

Це загальна потужність, що випромінюється джерелом в діапазоні довжин хвиль від λ до $\lambda + \delta\lambda$ в конусі одиничного тілесного кута:

$$R = A_s S(\lambda) , \quad [\text{Вт}/(\text{мкм} \cdot \text{стер})] \quad (1.5)$$

де $S(\lambda)$ вважається сталою по площі поверхні A_s джерела. [1]

1.2 Принципи формування та прив'язки зображень

Характеристики об'єктів можуть бути вивчені дистанційно за допомогою зйомки спостережуваної сцени різними за принципом дії сканувальними пристроями. Під сценою, в загальному сенсі, будемо розуміти тривимірний спостережуваний простір з розташованими в ньому об'єктами, що візуалізується на зображенні [3]. В загальному випадку зйомка може вестися в різних областях спектра: видимій, інфрачервоній, радіолокаційній тощо. В такому випадку зйомка ведеться декількома пристроями одночасно. Зображення, отримане в k -му спектральному діапазоні ($k = \overline{1, K}$), являє собою таблицю значень яскравості $B_k(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, що утворюють матрицю $\mathbf{B}_k = [B_k(m, n)]$, де m , n - відповідно номери стовпчиків та рядків. За одночасної зйомки в K спектральних діапазонах утворюється набір зображень $B(m, n) = \{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\}$, котрі формуються в процесі сканування точок спостережуваної сцени в результаті інтегрування та перетворення променевої енергії:

$$B_k(m, n) = \int_0^\infty E(X, Y, Z, \lambda) S_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}, \quad (1.6)$$

де $E(X, Y, Z, \lambda)$ - спектральна яскравість точки спостережуваної сцени з координатами (X, Y, Z) , що відповідає елементу зображення з координатами (m, n) ;

$S_k(\lambda)$ - спектральна чутливість датчика в k -му спектральному діапазоні;

λ - довжина хвилі випромінювання.

Дистанційне вивчення об'єктів земної поверхні базується на оцінці їхніх геометричних, енергетичних та спектральних характеристик за результатами обробки й аналізу спектрозональних зображень $B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$. Точність такої оцінки визначається тим, наскільки точно встановлено відповідність між спектральною яскравістю точок земної поверхні $E(X, Y, Z, \lambda)$ та елементами зображень $B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$ (тобто пікселями).

Така відповідність може бути охарактеризована двома частковими та незалежними відповідностями: координатною $(m, n) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ та відповідністю яскравості $\{B_k(m, n), k = \overline{1, K}\} \leftrightarrow E(X, Y, Z, \lambda)$.

Пряма координатна відповідність у загальному випадку визначається так:

$$X = F_X(m, n), \quad Y = F_Y(m, n), \quad Z = F_Z(m, n), \quad (1.7)$$

де F_X, F_Y, F_Z - функції, що описують процес сканування точок спостережуваної сцени в умовах переміщення сканувального пристрою (наприклад, при русі літального апарату при аерофотозйомці).

Після визначення функцій F_X, F_Y, F_Z відповідність яскравості між однойменними точками зображення та спостережуваної сцени можна охарактеризувати деяким оператором F_B :

$$B(m, n) = F_B[E(X, Y, Z, \lambda)] \quad (1.8)$$

Геометрична структура зображень $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$ залежить від багатьох детермінованих та випадкових факторів. Детерміновані фактори можна описати аналітично. Вони, головним чином, визначають вигляд функцій F_X, F_Y, F_Z . Дію випадкових факторів можна врахувати лише із залученням опорної координатної інформації, наприклад зіставляючи координати однойменних точок на зображеннях $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$ та електронній мапі $K(x, y)$, зареєстрованій в деякій СК xu . Задача координатної обробки полягає в тому, щоб шляхом геометричної трансформації зображень $B_k(m, n), k = \overline{1, K}$ отримати набір таких зображень $D(x, y) = \{D_k(x, y), k = \overline{1, K}\}$, які максимально співпадали б за геометрією з мапою $K(x, y)$. В даному випадку мапа розглядається як найбільш точна геометрична модель відображення точок поверхні на площину.

Формально процес координатної обробки можна визначити у вигляді прямої геометричної відповідності:

$$x = F(m, n), y = G(m, n), m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N} \quad (1.9)$$

або у вигляді оберненої відповідності:

$$m = f(x, y), n = g(x, y), x = \overline{1, X}, y = \overline{1, Y}, \quad (1.10)$$

де (m, n) та (x, y) - відповідно координати однойменних точок на вихідному $B(m, n)$ та перетвореному $D(x, y)$ зображеннях;

F, G та f, g - прямі та обернені функції геометричної обробки.

Тобто сутність прив'язки сформованого зображення полягає в тому, що кожному його елементу ставиться у відповідність певне еталонне значення просторової шкали (координата) чи шкали яскравості. Ці значення отримуються з реальних об'єктів спостережуваної сцени, які переносяться на зображення при його формуванні, а точніше з їхніх характеристик: геометричних (координати певних точок, лінійні розміри) та спектральних (яскравість, освітленість поверхні). Також можна проводити прив'язку і за параметрами положення знімальних пристроїв.

Особливе значення задача прив'язки має для обробки даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), тобто космічної та аерофотозйомки. Тому, з-поміж методів деяких інших областей, розглянемо основні методи прив'язки даних ДЗЗ.

1.3 Прив'язка за орбітальними даними

Часто основними причинами неточної просторової прив'язки даних ДЗЗ є похибки вимірів параметрів орбіти та кутів орієнтації літального апарата. Параметри орбіти визначаються за допомогою наземних та космічних навігаційних засобів, а кути орієнтації - за допомогою відповідних бортових вимірювальних систем. Результати вимірів враховуються під час геометричної

корекції зображень. Цим забезпечується їх початкова просторова прив'язка з точністю, що визначається точністю вимірів параметрів орбіти та кутів орієнтації.

Традиційно параметри орбіти супутників визначаються за допомогою наземних навігаційних засобів. Для цього періодично в геодезичній СК вимірюються вектор положення $\eta = (X_0, Y_0, Z_0)$ та вектор швидкості $V = (V_x, V_y, V_z)$ супутника. Ці виміри та момент часу їх проведення однозначно визначають вектор параметрів кеплерівської орбіти:

$$K = (a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, \tau_0), \quad (1.11)$$

де a_0 - велика напіввісь орбіти;

e_0 - ексцентриситет орбіти;

i_0 - нахил орбіти;

Ω_0 - довгота висхідного вузла;

ω_0 - аргумент перицентра орбіти;

τ_0 - час проходження перицентра на момент часу t_0 задання початкових умов.

Перші п'ять із цих параметрів у межах кеплерівської моделі орбіти є постійними та не змінюються під час руху супутника, шостий параметр τ_0 визначає положення супутника на орбіті в кожний фіксований момент часу. Уточнення параметрів орбіти здійснюється періодично з використанням більш складних моделей руху супутника по збуреній орбіті.

Поява супутникових навігаційних систем, таких як ГЛОНАСС/GPS, створила передумови для побудови більш точних технологій навігації літальних апаратів та просторової прив'язки даних ДЗЗ. Точність вимірювання η та V в цих системах порівнянна з точністю традиційно використовуваних наземних засобів. Вона складає для просторових координат порядку 40-100 м, для компонент вектору швидкості порядку 10 см/с. Диференційний режим вимірювання η та V для космічних об'єктів складно реалізувати. Тому визначальною передумовою для побудови більш точної оцінки параметрів орбіти супутника є той факт, що дані

про положення та швидкість супутника передаються періодично через малі проміжки часу, зазвичай щосекунди. І хоча ці дані містять похибки, але за рахунок обробки вкрай надлишкової кількості вимірювань стає можливим розв'язання двох важливих задач. По-перше, використовуючи ті чи інші процедури фільтрації, суттєво зменшити похибку вимірювань. По-друге, знизити похибки оцінки параметрів орбіти, обумовлені різноманітними факторами збурення, тобто перейти від кеплерівської до більш точної моделі руху супутника по збуреній орбіті.

Можливі два варіанти уточнення параметрів орбіти за даними навігаційних систем ГЛОНАСС/GPS.

У першому варіанті спочатку здійснюється фільтрація вимірювань $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}$ та формування більш точних значень $X_{0i}^*, Y_{0i}^*, Z_{0i}^*, V_{xi}^*, V_{yi}^*, V_{zi}^*$, де i відповідає моменту часу t_i вимірювання навігаційних параметрів. Далі за $X_{0i}^*, Y_{0i}^*, Z_{0i}^*, V_{xi}^*, V_{yi}^*, V_{zi}^*$ обчислюються географічні координати λ_i, φ_i сканованої точки за відомими формулами сферичної геодезії.

У другому варіанті спочатку на основі вимірювань $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}$ розраховуються параметри кеплерівської орбіти $a_{0i}, e_{0i}, i_{0i}, \Omega_{0i}, \omega_{0i}, \tau_{0i}$ для різних моментів часу t_i . Потім виконується фільтрація параметрів $a_{0i}, e_{0i}, i_{0i}, \Omega_{0i}, \omega_{0i}$, з урахуванням того важливого факту, що вони характеризують положення та форму орбіти і не залежать від часу, тобто при зміні t_i повинні залишатися незмінними, а всі їхні зміни можна віднести до похибок вимірювань $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}$ та дії різноманітних факторів збурення орбіти. У результаті формуються уточнені значення $a_{0i}^*, e_{0i}^*, i_{0i}^*, \Omega_{0i}^*, \omega_{0i}^*$. Нарешті, за $a_{0i}^*, e_{0i}^*, i_{0i}^*, \Omega_{0i}^*, \omega_{0i}^*$ та τ_{0i} визначаються географічні координати λ_i, φ_i сканованої точки.

Другий варіант, на відміну від першого, володіє безсумнівною перевагою в сенсі виконання оптимальної фільтрації та досягнення більш високої точності оцінки параметрів орбіти. При використанні даних ГЛОНАСС/GPS стає можливим нейтралізувати вплив факторів, що збурюють орбіту супутника. Це реалізується шляхом оцінки параметрів $a_{0i}^*, e_{0i}^*, i_{0i}^*, \Omega_{0i}^*, \omega_{0i}^*$ на різних ділянках роботи

супутника, тобто переходом від кеплерівської орбіти до моделі збуреної орбіти. Основними факторами збурення є:

- зміна гравітаційного поля внаслідок несферичності Землі та нерівномірності розподілу її маси;
- тяжіння з боку Місяця та Сонця;
- опір середовища під час руху космічного апарату;
- тиск сонячного світла;
- інші фізичні фактори.

Ці фактори діють доволі плавно та можуть бути парирувані процедурою фільтрації навігаційних вимірювань за другим варіантом, описаним вище.

Подальше уточнення просторової прив'язки може бути виконане лише із залученням опорної координатної інформації у вигляді електронних мап, зір, наземних орієнтирів, ОТМ та ін. Загалом ця операція реалізується з допомогою аналітико-регресійної технології [2]. При цьому в силі залишається твердження про те, що похибки вимірювань орбітальних та кутових параметрів відносно їхніх номінальних значень відповідають відхиленням вхідних параметрів функцій обробки (1.9) та (1.10).

1.4 Прив'язка за мапами

Останніми роками в практику ДЗЗ активно вводиться спосіб уточнення просторової прив'язки супутникових зображень з використанням векторних електронних мап. Цей процес базується на автоматичній чи автоматизованій ідентифікації об'єктів мапи з однойменними об'єктами на зображенні. Така технологія призводить до збільшення часу обробки даних ДЗЗ, але дозволяє виконати просторову прив'язку практично з точністю, що визначається роздільною здатністю зображення та точністю мапи. Для прив'язки зазвичай використовуються берегові лінії морів, рік та озер, так як ці об'єкти добре вирізняються на космічних зображеннях, в достатній кількості присутні на

поверхні Землі, є традиційними атрибутами багатьох мап та характеризуються високою часовою стійкістю.

Процес реалізується таким чином. Спочатку виконується перетворення вихідного знімку $B(m,n)$ у картографічну проекцію, в якій представлена електронна мапа. Отримане зображення $D(x,y)$ за допомогою оператора виділення контурів переводиться в бінарну форму $S(x,y) \in \{0,1\}$, де $S(x,y)=1$ відповідає належності точки з координатами (x,y) контуру. Потім векторна мапа $K(x,y)$ перетворюється в растрову форму представлення. Після цього зображення $S(x,y)$ розбивається на прямокутні фрагменти, і для кожного з них здійснюється пошук однойменного фрагменту на мапі. Формується таблиця відповідності координат центральних точок однойменних фрагментів знімку та мапи $(x_i, y_i) \leftrightarrow (x_i^*, y_i^*)$, де (x_i, y_i) та (x_i^*, y_i^*) - координати центрів i -ї пари фрагментів мапи та знімку. На основі цієї таблиці за МНК формуються функції уточнення координатної прив'язки.

1.5 Прив'язка за зорями

Уточнення просторової прив'язки даних ДЗЗ може бути здійснене за зорями, що виступають у якості опорних точок. Такий підхід потребує встановлення на космічний апарат спеціального датчика зоряного неба, який повинен володіти високим розрізненням та чутливістю, достатньо широкою смугою огляду та високою точністю визначення кутів напрямку на зорі. Цей датчик, синхронно працюючи з основним сканувальним пристроєм, реєструє ділянки зоряного неба. Інформація від зоряного датчика повинна бути з високою точністю прив'язана до часу сканування земної поверхні та передана з основними відеоданими. Для геостационарних систем ДЗЗ встановлення зоряного датчика є необов'язковою, так як ділянка зоряного неба, що знаходиться поза диском Землі, може бути зареєстрована основним сканувальним пристроєм.

Загальна технологія уточнення просторової прив'язки зображень за зоряним небом будується таким чином. організується каталог зоряного неба, що включає

зорі до 6-8-ї зоряної величини. Цей каталог доповнюється програмними засобами, що забезпечують вибірку фрагмента зоряного неба, що відповідає заданому моменту часу початку сканування земної поверхні. В результаті забезпечується формування в СК зоряного каталогу uv опорного зображення зоряного неба $K(u,v)$. В процесі сканування земної поверхні синхронно формується зображення $B(m,n)$ та зображення зоряного неба $K^*(m,n)$. Далі здійснюється перетворення координат зір опорного зображення $K(u,v)$ в систему координат зоряного датчика:

$$\begin{aligned} m &= F_m(u, v), \\ n &= F_n(u, v), \end{aligned} \tag{1.12}$$

де F_m, F_n - функції, що описують перетворення з СК зоряного каталогу в СК датчика з урахуванням геометрії його сканування. В результаті в СК зображення $B(m,n)$ формується опорне зображення зоряного неба $K(m,n)$. Після цього здійснюється пошук однойменних відміток зір на зображеннях $K^*(m,n)$ та $K(m,n)$, в результаті чого формується таблиця відповідності $(m_i, n_i) \leftrightarrow (m_i^*, n_i^*)$, де (m_i, n_i) та (m_i^*, n_i^*) - координати i -ї зорі на опорному зображенні $K(m,n)$ та реально отриманому $K^*(m,n)$. На основі цієї таблиці за МНК можна оцінити кути орієнтації супутника. На жаль, не є можливим уточнити за зорями просторове положення супутника.

1.6 Прив'язка за наземними орієнтирами

Уточнення координатної прив'язки можна виконати з використанням зображень характерних наземних орієнтирів, попередньо сформованих у вигляді еталонних опорних піктограм (фрагментів зображення). Поставлена задача розв'язується на основі пошуку однойменних фрагментів на реальному зображенні та зіставлення їхніх координат з координатами опорних фрагментів. Для практичної реалізації технології прив'язки за наземними орієнтирами необхідно розв'язати дві основні задачі. По-перше, створити каталог еталонних піктограм,

для яких з високою точністю повинні бути визначені географічні координати. Цей каталог повинен постійно поновлюватися та доповнюватися. По-друге, необхідно розробити високонадійні процедури ідентифікації на реально спостережуваному зображенні опорних наземних орієнтирів. Основні труднощі тут пов'язані з наявністю геометричних, радіометричних та інших розбіжностей між еталонним та реально спостережуваним зображеннями, що обумовлені неоднаковими умовами зйомки, сезонними змінами, появою нових об'єктів поблизу первинно визначених і т.д. На основі зіставлення координат однойменних об'єктів нескладно розв'язати задачу оцінки функцій координатної прив'язки зображення або виконати уточнення окремих параметрів орбіти та кутів орієнтації супутника.

1.7 Детектори кутів

Деяке зацікавлення справляє задача просторової прив'язки, що має ширший спектр застосовності, не обмежуючись даними ДЗЗ. Мова йде про детектори кутів на зображенні, що використовують ідею прив'язки за особливими точками.

Особлива точка (ОТ) або точкова особливість (англ. *point feature*, *key point feature*) - це точка зображення, окіл якої $o(m)$ можна відрізнити від околу будь-якої іншої точки зображення $o(n)$ в деякому іншому околі особливої точки $o_2(m)$. В якості околу точки зображення для більшості алгоритмів береться вікно зі стороною порядку до 10 пікселів (рисунок 1). Власне, за саму точку приймається піксель, розташований в центрі цього околу.

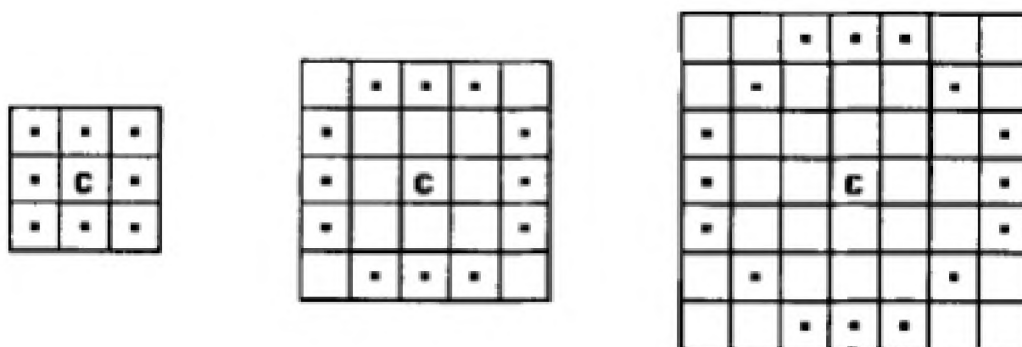


Рисунок 1.1 – Околи визначення ОТ

Процес визначення ОТ досягається шляхом використання детектора та дескриптора.

Детектор – це спосіб здобуття ОТ із зображення. Детектор забезпечує інваріантність знаходження одних і тих самих ОТ відносно перетворень зображення.

Дескриптор – ідентифікатор ОТ, що виділяє її з-поміж усієї множини інших ОТ. В свою чергу, дескриптори повинні забезпечувати інваріантність знаходження відповідності між ОТ відносно перетворень зображень.

ОТ знаходяться та виділяються на основі певних властивостей. У 1992 р. Haralick та Shapir виділили такі основні властивості ОТ:

- відмінність – ОТ повинна явно виділятися на фоні та бути унікальною в своєму okolí;
- інваріантність – визначення ОТ повинно бути інваріантним відносно афінних перетворень;
- стабільність – визначення ОТ повинно бути стійким до шумів та похибок;
- унікальність – окрім локальної відмінності, ОТ повинна володіти глобальною унікальністю для покращення розрізнення повторюваних патернів;
- інтерпретовність – ОТ повинні визначатися так, щоб їх можна було використовувати для аналізу відповідності та виділення інтерпретовної інформації з зображення.

У 2006 Tuytelaars и Mikolajczyk виділили інакший список властивостей для визначення ОТ:

- повторюваність – ОТ знаходиться в одному і тому ж місці сцени чи об'єкта зображення, незважаючи на зміни точки огляду та освітленості;
- відмінність / інформативність – околиці ОТ повинні мати суттєві відмінності один від одного, так, щоб можна було виділити та зіставити ОТ;
- локальність – ОТ повинна займати невелику область зображення, щоб зменшити ймовірність чутливості до геометричних та фотометричних спотворень між двома зображеннями, знятими в різних точках огляду;

- кількість – число знайдених ОТ повинно бути достатньо великим, так щоб їх було достатньо для виявлення навіть невеликих об'єктів, однак оптимальна кількість ОТ залежить від предметної області. В ідеалі, кількість виявлених ОТ повинно адаптивно визначатися з використанням простого та інтуїтивного порогу. Щільність розташування ОТ повинна відображати інформаційний зміст зображення, щоб забезпечити його компактне представлення;

- точність – виявлені ОТ повинні точно локалізуватися, як у вихідному зображенні, так і в узятому в іншому масштабі;

- ефективність – час виявлення ОТ повинен бути допустимим у критичних за часом застосуваннях.

В цілому, ці дві групи властивостей перетинаються, але по-різному інтерпретуються, тому можуть використовуватися разом, доповнюючи одна одну.

Детектори кутів та інші детектори ОТ спираються на ці властивості. Існує доволі великий спектр різноманітних детекторів, застосовних у різних областях. Визначимо основні властивості, принципи дії та типи детекторів кутів, як однієї з визначних груп детекторів ОТ.

Під кутом будемо розуміти ОТ, що формуються з двох чи більше граней, і грані зазвичай визначають межу між різними об'єктами та/або різними частинами одного об'єкта. Інакше кажучи, кути – це точки, в яких в околі інтенсивність змінюється відносно центра (x,y) . Кути визначаються за координатами та змінам яскравості граничних точок зображення. Головна властивість таких точок полягає в тому, що в області навколо кута у градієнта зображення переважають два домінуючих напрями, що робить їх відмінними. Градієнт – векторна величина, що показує напрям найшвидшого зростання функції інтенсивності (яскравості) зображення $I(x,y)$. Так як зображення дискретне, то вектор градієнта визначається через часткові похідні по осях x та y через зміни інтенсивностей сусідніх точок зображення. Більшість методів розглядають кутоватість, що залежить від похідної 2-го порядку, тому загалом методи чутливі до шуму.

В залежності від кількості граней, що перетинаються, існують різні види кутів: L-, Y- (або T-) та X- зв'язні (іноді окремо виділяються ще стрілоподібно зв'язні). Наочно ці типи показані на рисунку 1.2:



Рисунок 1.2 – Основні види кутів

Підходи до виділення ОТ можна розділити на 3 групи:

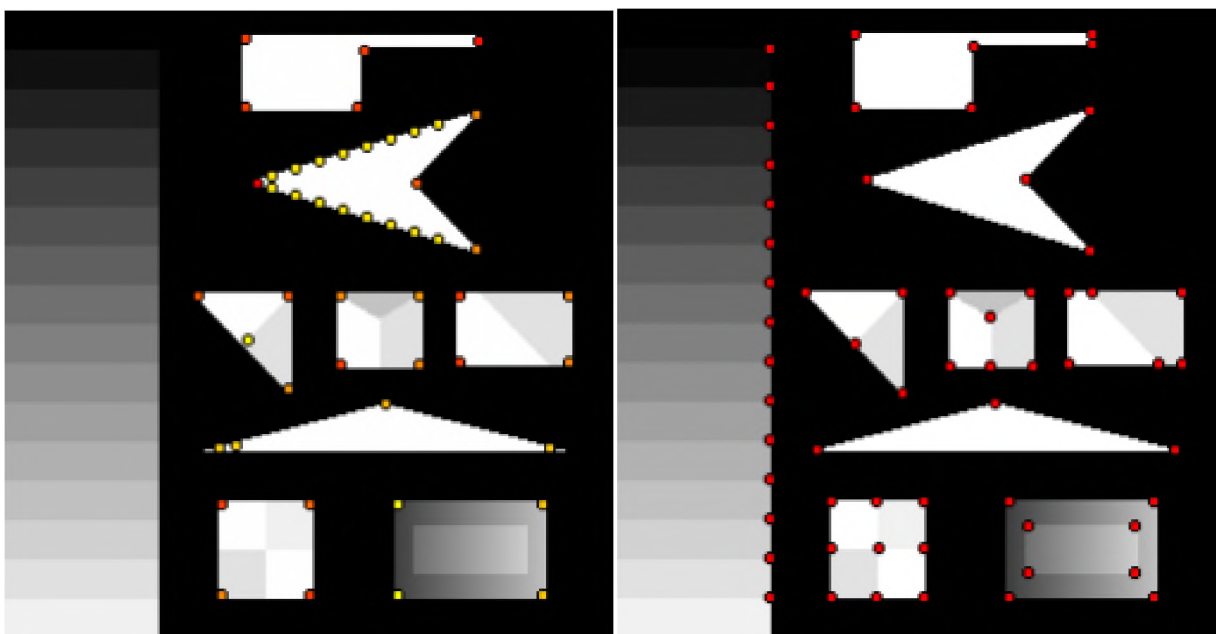
1. Засновані на інтенсивності зображення: ОТ знаходяться на пряму зі значень інтенсивностей пікселів зображення.

2. Ті, що використовують контури зображення: методи визначають контури та шукають місця з максимальним значенням кривизни або роблять полігональну апроксимацію контурів та визначають перетини. Ці методи чутливі до околів перетинів, оскільки знаходження часто може бути неправильним у тих місцях, де перетинаються 3 чи більше меж.

3. На основі використання моделі: використовуються моделі з інтенсивністю в якості параметрів, які підлаштовуються до зображень-шаблонів до субпіксельної точності. Мають обмежене застосування з ОТ спеціальних видів (наприклад, з L-зв'язними кутами), залежать від використовуваних шаблонів.

На практиці найбільше розповсюджені методи, що базуються на інтенсивності зображення.

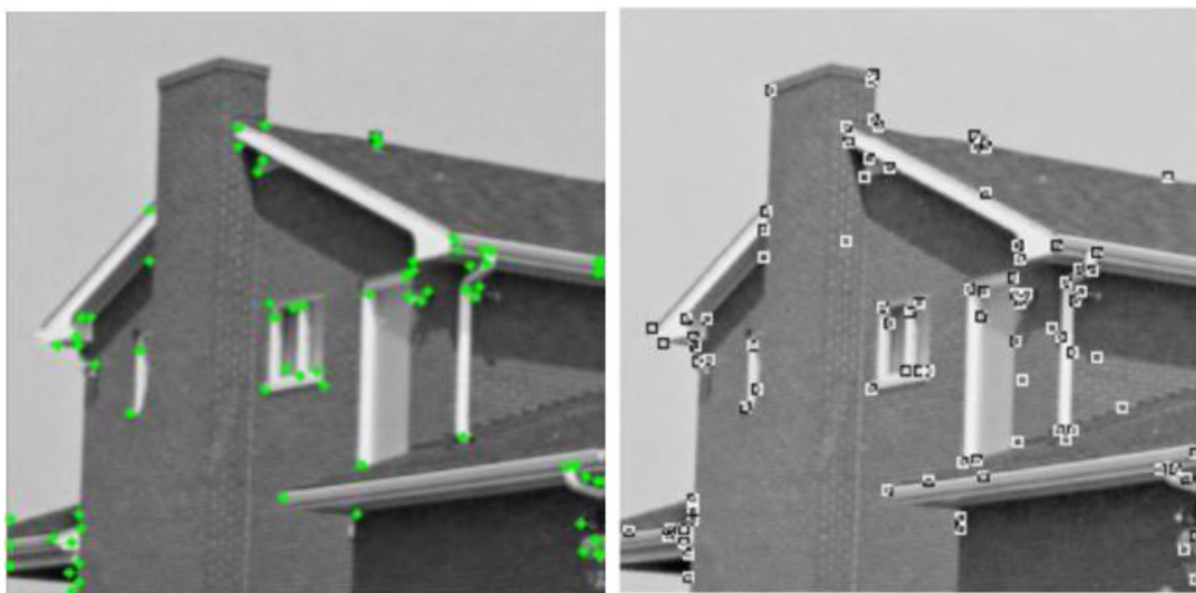
На рисунках 1.3, 1.4 в якості наочного прикладу показано результат роботи деяких основних детекторів [10].



а)

б)

Рисунок 1.3 - Результат роботи детекторів Харріса (оператор Plessey) (а) та алгоритму SUSAN (б) на штучному зображенні Сміта (The synthetic test pattern of Smith)



а)

б)

Рисунок 1.4 - Результат роботи детекторів Харріса (оператор Plessey) (а) та алгоритму SUSAN (б) на тестовій фотографії будинку

1.8 Виділення контурів та границь

Це набір математичних методів, спрямованих на виявлення точок цифрового зображення, в яких яскравість зображення змінюється різко, або, формальніше, має розриви. Точки, в яких яскравість зображення змінюється різко, зазвичай утворюють набір відрізків кривих ліній, що називаються контурами (англ. edge). Аналогічна задача знаходження розривів в одномірних сигналах відома як виявлення сходинок, а задача знаходження розривів сигналу в часі відома як виявлення змін. Виявлення контурів є основним інструментом в обробці зображень, машинному зорі та комп'ютерному зорі, особливо в областях виявлення ознак та виділення ознак.

Метою виявлення різких змін яскравості зображення є фіксування важливих подій та змін у властивостях світу. Може бути показано, що за досить загальних припущень стосовно моделі формування зображення, розриви яскравості зображення, ймовірно, відповідають розривам в глибині, розривам у орієнтації поверхні, змінам у властивостях матеріалу та відхиленням в освітленні спостережуваної сцени.

В ідеальному випадку, результатом застосування до зображення детектора контурів може бути набір з'єднаних кривих, що позначають межі об'єктів, межі забарвлення поверхонь, а також усі криві, що відповідають розривам в орієнтації поверхонь. Таким чином, застосування алгоритму виявлення контурів до зображення може значно зменшувати кількість даних, що підлягають обробці, відфільтровуючи інформацію, яка може розглядатися як менш значуща, але зберігаючи важливі структурні властивості зображення. Якщо крок виявлення контурів є успішним, то подальшу задачу інтерпретування інформаційного вмісту первісного зображення може бути істотно спрощено. Проте не завжди можливо отримувати такі ідеальні контури в картинах реального світу середньої складності. Контури, виділені з нетривіальних зображень, часто пошкоджено фрагментацією, що означає, що криві контурів не є з'єднаними, відсутні відрізки контурів, а також є хибні контури, що не відповідають досліджуваному явищу в зображенні —

ускладнюючи таким чином подальшу задачу інтерпретування даних зображення. Виявлення контурів є одним з основних кроків в обробці зображень, аналізі зображень, розпізнаванню образів у зображеннях, та в методиках комп'ютерного бачення.

Контури, виділені з двовимірного зображення тривимірної сцени, може бути класифіковано або як залежні від точки огляду (англ. *viewpoint*), або як незалежні від неї. Незалежний від точки огляду контур зазвичай відображає властивості, притаманні тривимірним об'єктам, такі як забарвлення поверхні та її форма. Залежний від точки огляду контур може змінюватися при зміні точки огляду, і зазвичай відображає геометрію сцени, таку як затуляння одного об'єкту іншим.

Типовий контур може бути, наприклад, межею між блоками червоного та жовтого кольорів. З іншого боку, лінія (яку може бути виділено детектором хребтів) може бути невеликою кількістю пікселів іншого кольору на в іншому незмінному тлі. Тому зазвичай для лінії може бути по одному контуру з кожного з її боків. Контури мають досить важливе значення в багатьох застосуваннях обробки зображень, особливо в системах машинного зору, які аналізують сцени штучних об'єктів за фіксованого освітлення. В останні роки, однак, було послідовно (й успішно) проведено дослідження методів комп'ютерного зору, які не покладаються на виявлення контурів як на крок попередньої обробки.

Одним з найвідоміших є метод Кенні (John F. Canny), винайдений у 1986 році. Кенні вивчав математичну проблему отримання фільтру, що був би оптимальним за критеріями виділення, локалізації та мінімізації декількох відкликів одного краю. Це означає, що детектор повинен був реагувати на границі, але при цьому ігнорувати хибні, точно визначати лінію границі (без її фрагментування) і реагувати на кожну границю один раз, що дозволило б уникнути сприйняття широких смуг зміни яскравості як сукупності границь. Кенні ввів поняття Non-Maximum Suppression (пригнічення не-максимумів), яке означає, що пікселями границь називаються точки, в яких досягається локальний максимум градієнта в напрямі вектора градієнта.

Алгоритм складається з п'ятих окремих кроків: згладжування (розмиття зображення для пригнічення шумів), пошук градієнтів (границі відмічаються там, де градієнт зображення набуває максимального значення), пригнічення не-максимумів (тільки локальні максимуми визначаються як границі), подвійна порогова фільтрація (потенційні границі визначаються порогами) та трасування області невизначеності (кінцеві границі визначаються шляхом пригніченням усіх меж, що не пов'язані з визначеними (сильними) границями).

На рисунку 1.5 показано приклад роботи детектору границь Кенні.

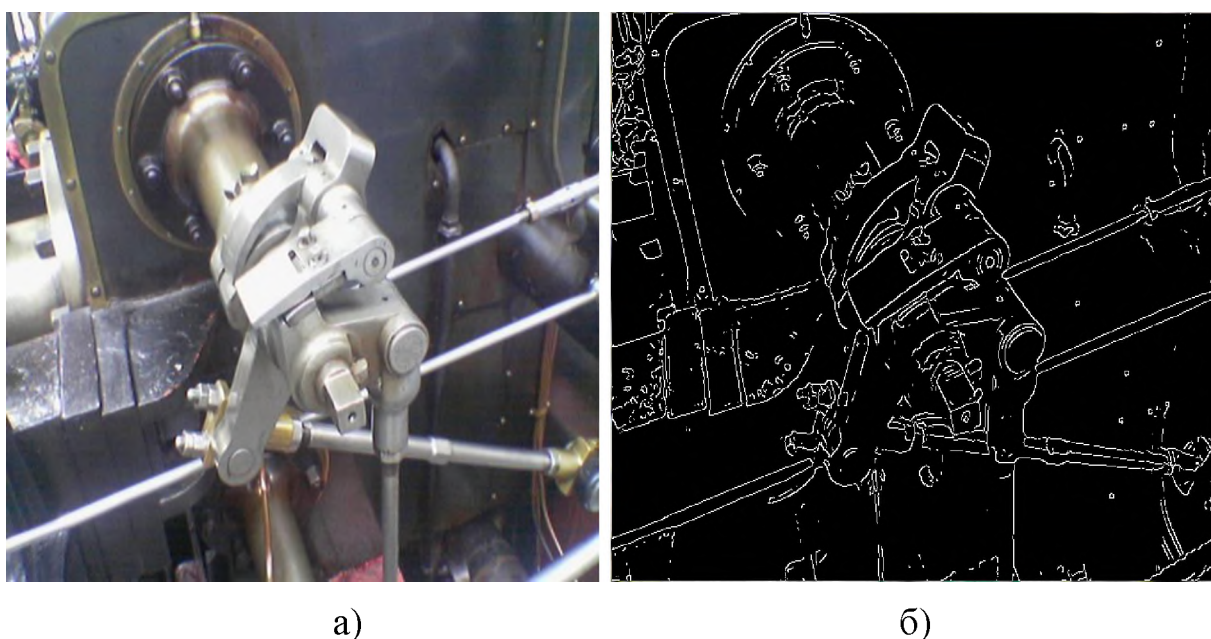


Рисунок 1.5 - Початкове зображення (а) та результат роботи з ним детектору границь Кенні (б)

Хоча його робота була проведена на самому початку розвитку комп'ютерного зору, детектор границь Кенні до нині є одним з найкращих детекторів. Окрім особливих часткових випадків складно знайти детектор, котрий працював би відчутно краще, ніж детектор Кенні. [10]

Висновки до розділу 1

У даному розділі були розглянуті базові принципи отримання зображень сканувальними пристроями, основні принципи прив'язки зображень та найпоширеніші способи просторової прив'язки даних ДЗЗ.

Прив'язка даних ДЗЗ є наочною та яскравою ілюстрацією різноманітності методів прив'язки, які базуються на різних типах орієнтирів, як у космосі так і на земній поверхні. Задача прив'язки не обмежується даними ДЗЗ та поширюється на інші сфери, що базуються на обробці зображень.

2 МАТЕМАТИЧНІ АСПЕКТИ ПРИВ'ЯЗКИ

2.1 Методи корекції яскравості зображень

Яскравість пікселів зображення у певних спектральних каналах дає уявлення про оптичні характеристики об'єктів та поверхонь, які містить сцена. Тому для багатьох прикладних задач точне передання таким чином характеристик на зображення є важливим. Проблеми з точністю передання яскравості можуть виникнути через погане калібрування чи набуту несправність оптичних сенсорів. Це, в свою чергу, формує потребу в методах корекції зображень.

Якщо прийняти спотворення зображення X як певну невідому функцію $Y=f(X)$, то процес корекції є застосуванням $f^{-1}(Y)$. Аргументами функцій є поелементно множини усіх пікселів відповідних зображень.

Існує доволі багато алгоритмів. Вибір найбільш доцільного алгоритму є загалом задачею нетривіальною та залежить від зображення, що підлягає обробці, та від бажаного результату.

Надамо короткий опис найтипівіших алгоритмів.

Алгоритм Autolevel - базується на принципі: найтемніший колір на зображенні є чорним, а найсвітліший - білим. Тобто, якщо зображення містить невеликі дуже яскраві чи дуже темні ділянки, то є велика ймовірність, що алгоритм не дасть бажаного результату. Також Autolevel дужч чутливий до імпульсного шуму.

Лінійна корекція звуженням чи розтягом - базується на різниці найтемнішого пікселя та найсвітлішого:

$$f^{-1}(y) = (y - y_{min}) \cdot \frac{(255-0)}{(y_{max}-y_{min})} \quad (2.1)$$

Нелінійна компенсація. Буває різних типів, застосовних в залежності від ситуації.

Гама-корекція - заснована на степеневому перетворенні яскравості пікселів. У цьому алгоритмі інтенсивність темних пікселів збільшується сильніше, ніж інтенсивність світлих пікселів:

$$y = c \cdot x^{\gamma} \quad (2.2)$$

Варто зазначити, що розглянуті вище алгоритми не враховують локальні околиці пікселів, тому в тих випадках, коли зображення містить як сильно темні, так і сильно світлі локальні області, ці алгоритми не можуть забезпечити якісне відновлення зображення. В таких ситуаціях доцільно застосовувати алгоритм Retinex и его модификации, тобто логарифмічну корекцію:

$$y = c \cdot \log(1 + x) \quad (2.3)$$

Корекція може проводитися з допомогою багатьох інших нелінійних функцій. [10]

У тих завданнях, де функція $f(x)$ передбачає трудомісткі обчислення (множення, ділення, розрахунки тригонометричних функцій, статистичних та інших функцій), застосування безпосередньо прямого методу перетворення яскравості може виявитись взагалі неприйнятним. Час виконання обробки залежить від її обчислювальної складності. Для запобігання таких незручностей застосовують табличний метод, що отримав широке розповсюдження у практиці цифрової обробки зображень. Сутність табличного методу полягає в тому, що шляхом попереднього розрахунку створюють таблицю функції $y = f(x)$. Під час обробки зображення замість обчислень використовують готові результати шляхом звернення до цієї таблиці. Значення вхідної яскравості x використовують для визначення номера стовпчика, з якого треба прочитати значення перетвореного сигналу y . Виконання цієї нескладної операції у порівнянні з безпосереднім обчисленням значень y дозволяє зробити обробку технологічною, а тривалість обчислень стає незалежною від складності перетворення. [8]

2.2 Форми об'єктів прив'язки

У п.1.5 був описаний метод прив'язки знімків земної поверхні, заснований на локалізації певних піктограм-орієнтирів. Слід зазначити, що прив'язка виконується не за піктограмою, як такою, а за певною точкою чи множиною точок. Це можуть бути границі об'єкта, граничні кути, лінії чи центр симетрії, тощо. З урахуванням цієї особливості, цей метод виявляє себе більш ефективним, ніж прив'язка за береговими лініями водойм чи іншими природними об'єктами, оскільки важлива незмінність їхньої форми. Наприклад, озеро може змінюватися у рівні повноводності, що спричиняє зміну її берегової лінії, також оптичні властивості його поверхні залежать від чистоти води. Очевидно, прив'язка точніше буде здійснюватися за абсолютно статичними об'єктами, властивості яких не змінюються з часом, або швидкість їх зміни знехтовно мала.

Для реалізації прив'язки такого типу можлива побудова спеціальних калібрувальних полігонів з об'єктами, які мають заздалегідь визначену форму та властивості. У [4,5] розглянуто методи локалізації центральносиметричних об'єктів, тобто кіл фіксованого радіусу. Робота з об'єктами такого типу дозволяє керувати точністю прив'язки регулюванням лише декількох параметрів (розмір пікселя та радіус кола), але створення подібних полігонів супроводжується суттєвими витратами. В Україні, наприклад, такі полігони взагалі відсутні.

Тому доцільно отримати метод, який дозволяв би виконувати прив'язку знімків за об'єктами, які можуть мати будь-яку форму, але разом із тим дозволяють точно визначити їхні геометричні та спектральні параметри, а також координати розташування. Такими об'єктами можуть виступати будівлі та споруди, які займають достатньо велику площу, а оптичні властивості їх дахів та верхніх покривів дають можливість вирізнити їх з-поміж інших об'єктів на знімку: великі заводи та фабрики, стадіони, аеродроми і т.п.

Далі розглянемо різні методи, які по-різному залежать від форми об'єкта.

2.3 Параметризація границь об'єкта

У [5] пропонується метод для визначення оптимальних параметрів тест-об'єктів, які б давали мінімальну похибку оцінювання параметрів при обробці знімків. Розглядаються об'єкти круглої форми.

Розглядається не цілісне зображення і не окремі пікселі, а стовпчики шириною в один піксель. Зображення таким чином розділяється на стовпці (рисунок 2.1).

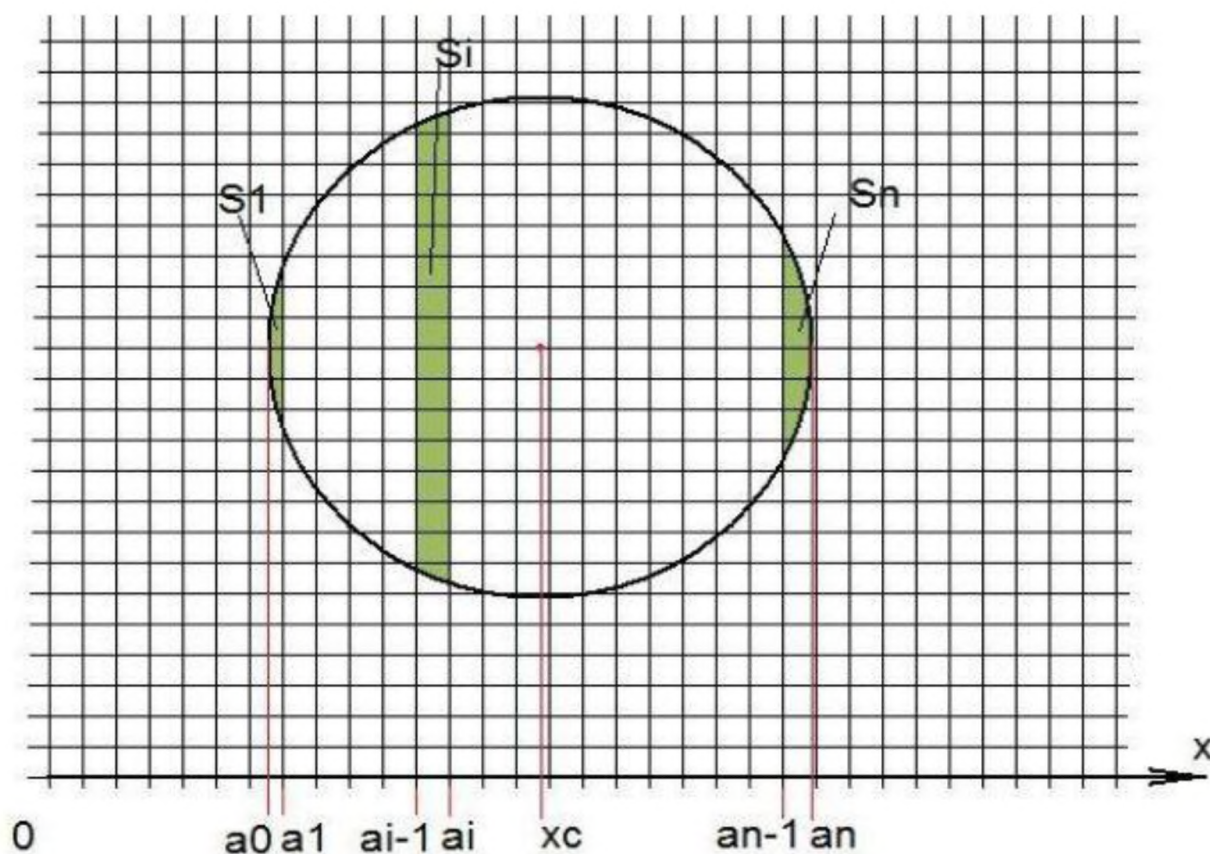


Рисунок 2.1 – Розділення вихідного зображення

Далі за сумою яскравостей окремих пікселів підраховується яскравість кожного стовпчика. Таким чином за сумою яскравостей стовпчиків можна оцінити площу зображеного кола (розглядаються чітко розрізнявані об'єкти, зображення контрастні).

Також для вираження яскравості кожного окремого стовпця була отримана така формула:

$$S(a_{i-1}, a_i, x, R) = (a_i - x_c) \sqrt{R^2 - (a_i - x_c)^2} + R^2 \sin^{-1} \frac{a_i - x_c}{R} - \\ - (a_{i-1} - x_c) \sqrt{R^2 - (a_{i-1} - x_c)^2} - R^2 \sin^{-1} \frac{a_{i-1} - x_c}{R}, \quad (2.4)$$

де a_{i-1}, a_i – межі i -го стовпця;

x_c – положення центру кола;

R – радіус кола.

Таким чином отримується набір площ (сум яскравостей за стовпцями) S_1, \dots, S_n та відповідних меж інтегрування a_0, \dots, a_n . Далі, використовуючи метод нелінійної оптимізації, знаходяться такі параметри R та x_c функції з (2.4), щоб мінімізувати суму квадратів відхилень.

Метод володіє шуканою субпіксельною точністю, але використання його обмежене, оскільки він працює лише для форми кола. Параметризація форм довільної форми може бути значно складнішою. Також слід зазначити, що метод призначений не стільки для вже існуючих об'єктів, скільки для попереднього розрахунку параметрів калібрувального об'єкта.

2.4 Метод центру мас та його модифікації

2.4.1 Властивості геометричного центру мас

У методі, описаному вище, особлива увага приділяється центру кола. Головна його властивість з точки зору геометрії в тому, що ця точка рівновіддалена від усіх точок кола. Ця проста властивість дозволяє ефективно аналізувати та коригувати спотворення.

Особливість подібного значення має будь-яка геометрична фігура. Мова йде про центр мас (ЦМ) або барицентр. ЦМ двовимірної області – це середнє арифметичне положень усіх точок фігури. Означення поширюється на будь-який

об'єкт в n -вимірному просторі – барицентр є середнім положенням усіх точок фігури по усіх координатних напрямках. З точки зору фізики, неформально – це точка рівноваги фігури з матеріалу сталої густини в умовах сталого за величиною та напрямом гравітаційного поля.

У фізиці термін «барицентр» може означати центр тяжіння або центр мас в залежності від контексту. Центр мас (та центр тяжіння у сталому гравітаційному полі) є середнім арифметичним усіх точок з урахуванням локальної густини або питомої ваги. Якщо фізичний об'єкт має сталу густину, то його ЦМ співпадає з геометричним ЦМ тієї ж форми.

Геометричний ЦМ опуклого об'єкта завжди лежить всередині цього об'єкта. Неопуклий об'єкт може мати ЦМ, що лежить за межами фігури. Наприклад, ЦМ кільця завжди лежить поза його фігурою.

Не будемо розглядати фізичні методи експериментального визначення ЦМ об'єктів (метод обвісу, метод балансування і т.д.), зосередимо увагу на аналітичних методах. Для довільних геометричних об'єктів ЦМ можна знайти різними способами в залежності від властивостей фігури та умов.

Найпростіша система, для якої може бути поставлена задача пошуку барицентру – це скінченна множина з k точок $x_1 \dots x_k$ в R^n . У цьому випадку барицентр знаходиться таким чином:

$$G = \frac{x_1 + \dots + x_k}{k} \quad (2.5)$$

де $x_1 \dots x_k$ – положення усіх точок системи;

k – кількість точок у системі.

Ця точка мінімізує суму квадратів відстаней від неї до усіх точок множини.

Частіше доводиться мати справу з неперервними фігурами. Для довільних плоских фігур існує декілька способів знаходження барицентра. Перший базується на геометричному розкладі складної фігури на простіші. Фігуру X можна

розділити на скінченну кількість простіших фігур X_1, \dots, X_n , знайти положення ЦМ G_i та площу A_i для кожної з них, після чого обчислити:

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{\sum_i G_{ix} A_i}{\sum_i A_i} \\ G_y &= \frac{\sum_i G_{iy} A_i}{\sum_i A_i} \end{aligned} \quad (2.6)$$

де G_i – барицентр i -ї фігури;

A_i – площа i -ї фігури.

Дірки у фігурі X , накладання частин та частини, що спричиняють неопуклість фігури, можна розглядати як фігури з від'ємною площею. Знак площі A_i потрібно обирати так, щоб сума знаків усіх A_i для всіх частин, що включають деяку точку p , була рівна 1, якщо p належить X , та 0 в інакшому випадку.

ЦМ підмножини X простору \mathbf{R}^n можна обчислити за допомогою інтегрування:

$$G = \frac{\int x g(x) dx}{\int g(x) dx}, \quad (2.7)$$

де x – змінна інтегрування по всьому простору \mathbf{R}^n ;

$g(x)$ – характеристична функція підмножини, яка приймає значення 1 всередині X та 0 за його межами.

Варто зауважити, що знаменник рівний просто мірі підмножини X . Таким чином формула незастосовна до множин з нульовою мірою або до таких, що інтеграл розбіжний. Формула справедлива і для простих фігур, хоча в цьому випадку роль міри буде грати площа.

Можна застосувати інтегрування інакшим чином для області, обмеженої графіками деяких неперервних функцій f та g , таких що $f(x) \geq g(x)$ на інтервалі

$[a, b]$, $a \leq x \leq b$. В цьому випадку координати ЦМ області x_c , y_c обчислюються таким чином:

$$x_c = \frac{1}{A} \int_a^b x[f(x) - g(x)]dx$$

$$y_c = \frac{1}{A} \int_a^b \left[\frac{f(x) + g(x)}{2} \right] [f(x) - g(x)]dx$$
(2.8)

де A – площа області, яка в свою чергу обчислюється за формулою:

$$A = \int_a^b [f(x) - g(x)]dx$$
(2.9)

Окремий спосіб існує для самонеперетинного багатокутника, який заданий координатами n вершин $(x_0, y_0), \dots, (x_n, y_n)$. Координати ЦМ обчислюються таким чином:

$$G_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$

$$G_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$
(2.10)

де площа A обчислюється за формулою:

$$A = \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$
(2.11)

У цих формулах приймається, що вершини пронумеровані вздовж периметра фігури. При цьому вважається, що вершина (x_0, y_0) співпадає з вершиною (x_n, y_n) . Варто зауважити, що якщо вершини будуть пронумеровані за годинниковою стрілкою, площа A матиме від'ємний знак.

2.4.2 Модифікація обчислень центру мас для дискретного зображення

Як було описано у п.1.2, знімок спостережуваної сцени формується як матриця значень яскравості, які мають певні координати, тобто позицію рядка та стовпчика. Інакше кажучи, ми отримуємо дискретне зображення, сформоване з пікселів. Якщо проводити аналогію з геометричними просторами, то пікселі грають роль розрізнених точок, а відстані стають кроковими, крок визначається розміром пікселя.

В цьому випадку велике значення має те, що зображення, в загальному випадку, не володіє абсолютним контрастом та розділенням. Яскравість пікселів приймає значення з певного інтервалу, і таким чином утворюються напівтони, тіні, також множини пікселів змішаного кольору на межах об'єктів. Якщо описувати зображення деякого чітко вирізненого об'єкта, то в термінах фізики маємо справу з тілом з нерівномірно розподіленою масою.

Повертаючись до п.2.4.1, можна вважати, що це випадок, до якого застосовна формула (2.5), але усі окремі точки системи (пікселі) зважені.

Враховуючи всі ці особливості, отримуємо таку формулу для визначення ЦМ яскравості дискретного зображення:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} B(i,j) \begin{pmatrix} id+1/2 \\ jd+1/2 \end{pmatrix}}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} B(i,j)} \quad (2.12)$$

де $B(i, j)$ - значення яскравості пікселя в позиції (i, j) ;

$[m \times n]$ - розмір зображення (в пікселях);

$[d \times d]$ – розмір пікселя (піксель приймається квадратним).

Формула чутлива до шумів та хибних перепадів яскравості. Але для успішної прив'язки зображення можна вручну або автоматизованими способами ізолювати об'єкт прив'язки від решти зображення. Про це йтиметься в наступному розділі.

Висновки до розділу 2

У даному розділі були розглянуті математичні методи прив'язки зображень, отримані раніше, які спеціалізуються на об'єктах круглої форми. Також були розглянуті основні властивості геометричного ЦМ та способи його аналітичного обчислення.

ЦМ має будь-яка фігура, тому з урахуванням цієї особливості можливе створення універсальних методів прив'язки саме за цією точкою.

Була отримана формула для методу ЦМ, адаптованого для застосування до дискретного зображення.

3 ОПИС ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ МОДЕЛІ

3.1 Тестові об'єкти

Під час формування знімку можуть мати місце похибки, як зазначалося раніше. У сенсі простору похибки являють собою зміну проекції пікселів у фізичних величинах (наприклад, у метрах), що спричинене вигином земної поверхні та рельєфом, що повинно проектуватися на плоску матрицю камери. У сенсі радіометрії може мати місце хибне представлення камерою реальних рівнів яскравості. При цьому не маються на увазі різноманітні шуми, вони в даній роботі не розглядаються.

Описані похибки об'єднує те, що у межах знімку вони підкоряються певному закону. Задача калібрування має на меті визначення цього закону шляхом встановлення відповідності еталонних параметрів з їхнім представленням на знімку.

Для ілюстрації виконання поставлених завдань, алгоритм, описаний нижче, застосовувався до сітки калібрувальних об'єктів. В якості сітки виступало напівтонове зображення високої роздільної здатності та глибини кольору, на якому містяться об'єкти форми довільних трикутників (калібрувальні вузли), розміщені на тлі нульової яскравості. Кожен з вузлів має визначене просторове положення та визначений унікальний рівень яскравості (див. Додаток А).

Взагалі, реальні аерокосмічні знімки володіють різним ступенем контрастності в залежності від умов, але в будь-якому разі контрастність не наближується до грубого напівтонового зображення, як у даному експерименті. При роботі з реальними знімками перед проведенням обчислень відносно об'єкта прив'язки доцільно ізолювати його від решти знімку, тобто провести сегментацію зображення. Це можна зробити або вручну, або автоматизовано з використанням існуючих або спеціально розроблених детекторів границь та кутів. Все залежить від постановки конкретної задачі, вимог до точності та наявних програмно-обчислювальних ресурсів. В даному експерименті було вирішено провести

тестування саме на контрастних зображеннях, цим самим умовно виконати операцію ізоляції об'єктів.

Оскільки не було можливості працювати з реальними об'єктами на місцевості та їхніми супутниковими знімками, було вирішено провести імітаційний експеримент з описаним вище зображенням, яке приймалося еталонним об'єктом: піксельну сітку даного зображення будемо вважати умовною фізичною просторовою сіткою, а рівні цифрової яскравості - умовною шкалою деякої реальної фотометричної величини. Конкретизувати фотометричну величину не має сенсу, оскільки нам не відомий закон аналого-цифрового перетворення умовної камери супутника, і нема потреби його використовувати в алгоритмі.

Для імітації знімку з похибками еталонне зображення піддавалося спотворенням.

Для спотворення яскравості виконувалося поелементне перетворення яскравості пікселів за законом:

$$y = 10 \cdot \sqrt{x}, \quad (3.1)$$

де x - яскравість пікселя на еталонному зображенні.

Дане спотворення можна візуалізувати порівнянням шкал, представлених у вигляді зображень послідовності стовпчиків пікселів однакової ширини. Еталонна шкала з лінійною залежністю фізичної яскравості від цифрової перетворюється за законом (3.1), таким чином в одній частині яскравість підвищується, а в іншій - знижується.



Рисунок 3.1 - Порівняння еталонної та спотвореної шкали яскравості

Для просторових спотворень застосовувалося стиснення, тобто погіршення роздільної здатності, разом з внесенням ефекту лінзи та поворотом сцени відносно однієї з бічних сторін на 10° .

3.2 Реалізація алгоритму

Алгоритм калібрування має дві стадії.

Спочатку проводиться прив'язка шкал яскравості, перш за все нульового та максимального значення, вручну. Рівні яскравості вузлів еталону та знімку приймаються як ключові, оскільки між ними можливе встановлення взаємно однозначної відповідності та проведення за цією відповідністю проміжної корекції шляхом лінеаризації цифрової шкали знімку. Цей етап, як і наступний, володіє субпіксельною точністю в тому сенсі, що при корекції відновлені рівні яскравості можуть бути обчислені з точністю, що перевищує різницю найближчих дискретних рівнів яскравості, що не може бути відображено на зображенні через особливості кодування, але може бути використано для інших проміжних обчислень, насамперед для просторового калібрування, про що йтиметься далі.

До рівнів, які не є ключовими, відносяться напівтони, що утворюються на границях об'єктів при погіршенні роздільної здатності:



Рисунок 3.2 - Границя об'єкта при високій (а) та низькій (б) роздільній здатності

Вони можуть бути відновлені лише приблизно. В цьому нема великої потреби про що буде більш детально розказано нижче.

Далі виконується просторове калібрування. Прив'язка просторової шкали проводиться за центрами мас яскравості кожного об'єкта. Ці точки шукаються за модифікованим методом знаходження центра мас, який був розроблений мною раніше. Для еталонних об'єктів ЦМ шукалися за координатами вершин фігур із застосуванням формул (2.10)-(2.11), а для ЦМ фігур на знімку - за формулою (2.12). Цей етап йде обов'язково після етапу яскравості, оскільки коректні рівні яскравості необхідні для правильного визначення координат ЦМ. Субпіксельна точність цього етапу полягає в тому, що положення ЦМ визначається не пікселем, а положенням всередині пікселя. Просторове калібрування має форму встановлення відповідності еталонних відстаней між конкретними вузлами та тими ж відстанями на знімку. Таким чином з'являється наочна інформація про зміну розмірів пікселів у різних частинах зображення, що може бути в подальшому використано для аналізу інформації за цією ж сценою або за іншими сценами, відзнятими цією ж камерою.

Точність методу при застосуванні в інших задачах подібного профілю визначається розмірами калібрувальної сітки, тобто кількістю вузлів у ній, а також різноманіттям рівнів яскравості, які можна відстежити за цими об'єктами.

Для програмної реалізації алгоритму та розрахунків використовувалося середовище MATLAB від MathWorks. З огляду на специфіку роботи з зображеннями, додатково був залучений спеціалізований додаток Image Processing

Toolbox. Усі скрипти, які були написані для аналізу та обчислень, наведені у Додатку Б.

3.3 Опис результатів

Для ілюстрації результатів у таблиці 3.1 представлені відстані D_{xi} між об'єктами в одному рядку та відстані D_{yk} між об'єктами на одному рівні в різних рядках. Об'єкти нумерувалися за порядком зліва-направо та зверху-вниз.

Таблиця 3.1 - Результати калібрування

	Еталон (2000x1000), одиниць	Знімок (816x406), пікселів	Співвідношення, од/пікс
$D_x (1;2)$	419	127,3	3,29
$D_x (2;3)$	416,63	173,95	2,4
$D_x (3;4)$	604,3	225,17	2,68
$D_y (1;5)$	539	196,6	2,74
$D_y (2;6)$	564,66	239,01	2,36
$D_y (3;7)$	516,3	236,96	2,17
$D_y (4;8)$	353	208,32	1,69

З даних таблиці можна спостерігати вигин та нахил сцени, що були внесені в якості спотворень.

Подібні розрахунки дозволяють більш точно оцінювати параметри об'єктів, що містяться на знімку, та параметри їхнього взаємного розташування.

Висновки до розділу 3

У даному розділі було обґрунтовано вибір рішень для програмної реалізації розробленого методу, описано процес постановки та проведення імітаційного експерименту, отримані результати оцінки, знайдені за допомогою розробленого методу.

Результати показують, що розроблений метод володіє субпіксельною точністю, універсальністю та можливістю розширення на більш складні задачі.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання даної роботи були детально вивчені теоретичні основи та сучасні методи прив'язки та корекції цифрових зображень.

Досліджені існуючі методи, що розроблені з досягненням субпіксельної точності.

Проведений аналіз застосовності вивчених методів для певних умов.

Запропонований та теоретично обґрунтований метод, який є незалежним від форми об'єкту, за яким проводиться прив'язка зображень, але при цьому володіє субпіксельною точністю.

Розроблений програмний алгоритм, який реалізує теоретично описаний метод.

Алгоритм випробувано на підготовленій вибірці тестових об'єктів з різними властивостями, результати роботи підтверджують субпіксельну точність розробленого методу.

Розроблений метод має перспективи для застосування для радіометричної та просторової прив'язки даних ДЗЗ в умовах відсутності калібрувальних полігонів, що є особливо актуальним для України.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1 Джексон Р.Г. Новейшие датчики [Текст]/ Р.Г.Джексон - М.: Техносфера, 2007 - с.106-110
- 2 Злобин В.К. Обработка аэрокосмических изображений [Текст]/ В.К. Злобин, В.В. Еремеев - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 - с.8-27
- 3 Лялько В.І., Попов М.О. Словник з дистанційного зондування Землі [Текст]/ В.І. Лялько, М.О. Попов - К.: СМП "Аверс", 2004 - 170с.
- 4 Макеєнко І.Л. Субпіксельне оцінювання параметрів об'єктів за аерокосмічними знімками [Текст]/ І.Л. Макеєнко, С.А. Смирнов А.В. Сидоренко // Наукові вісті НТУУ "КПІ" - Вип.6 - К., 2010 - с.156
- 5 Макеєнко И.Л. Расширение методов субпиксельного оценивания параметров сферично-симметричных объектов [Текст]/ И.Л. Макеєнко, С.А. Смирнов // Наука и современность, Изд. НГТУ - Новосибирск, 2012 - с.195
- 6 Гонзалес Р. Цифровая обработка изображений [Текст]/ Р.Гонзалес, Р.Вудс - М.: Техносфера, 2005 - 1071с.
- 7 Гонзалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB [Текст]/ Р.Гонзалес, Р.Вудс, С.Эддинс - М.: Техносфера, 2006 - 616с.
- 8 Творошенко І.С. Конспект лекцій з дисципліни "Цифрова обробка зображень" [Текст]/ ХНУМГ ім. О. М. Бекетова - Харків, 2017
- 9 Bourke P. Calculating the area and centroid of a polygon, 1998
- 10 <https://habrahabr.ru/>
- 11 <https://www.mathworks.com/products/image.html>
- 12 <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess>

ДОДАТОК А

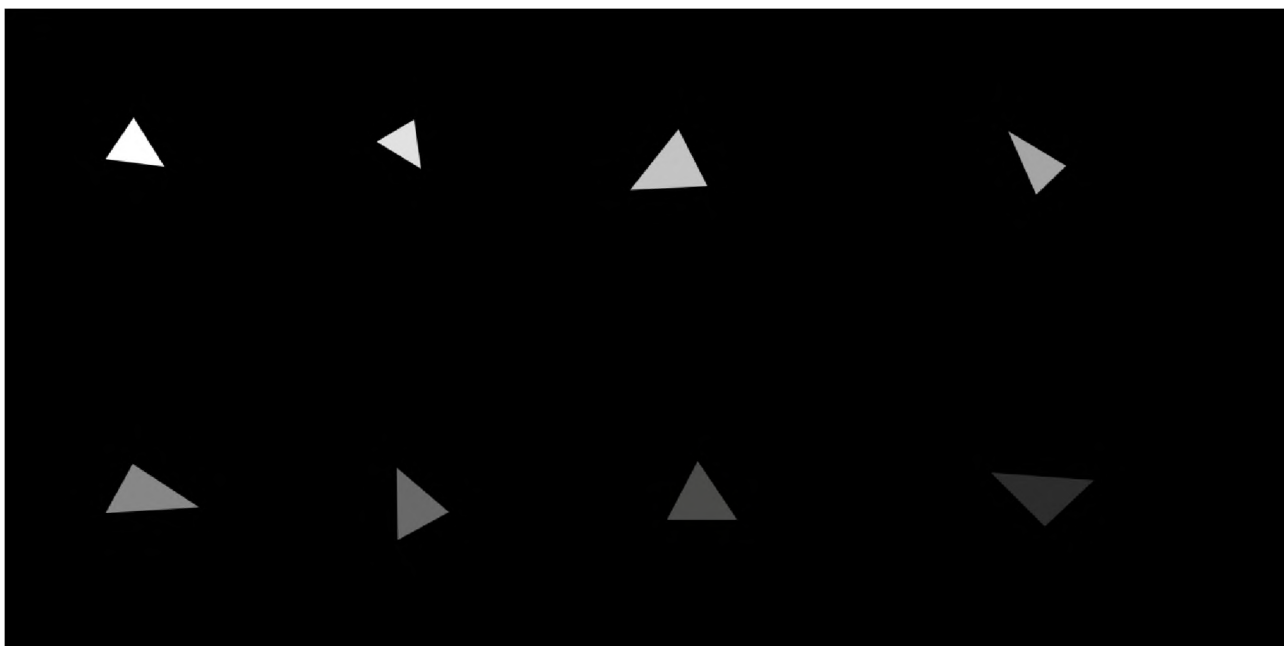


Рисунок А.1 – Імітація множини еталонних об'єктів

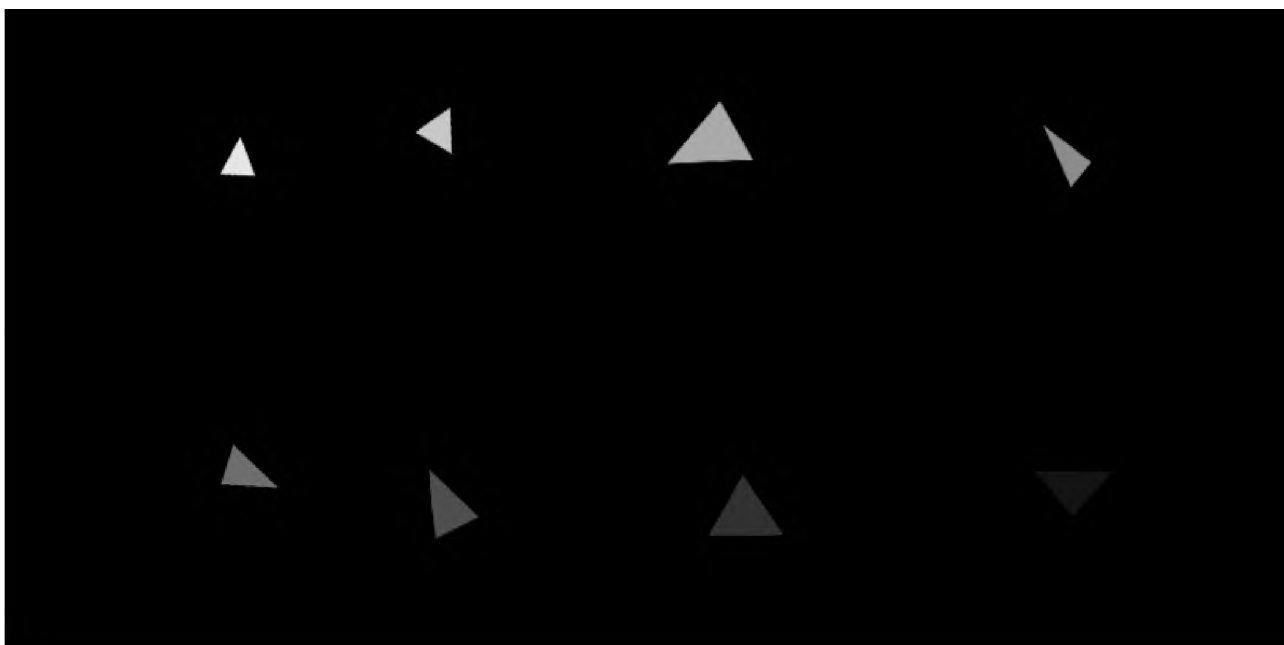


Рисунок А.2 - Імітація зйомки зі спотворенням

ДОДАТОК Б

Б.1 Функція S.m для розрахунку площі за координатами вершин

```
function SA = S(A)
SA=0;
[K,~]=size(A);
for i = 1:K-1
    SA=SA+(A(i,1)*A(i+1,2)-A(i+1,1)*A(i,2));
end
SA=SA/2;
end
```

Б.2 Функція MC.m для розрахунку координат еталонного ЦМ

```
function GA = MC(A)
GA=zeros(2,1);
[K,~]=size(A);
for i = 1:K-1
    GA(1)=GA(1)+((A(i,1)+A(i+1,1))*(A(i,1)*A(i+1,2)-
A(i+1,1)*A(i,2)));
    GA(2)=GA(2)+((A(i,2)+A(i+1,2))*(A(i,1)*A(i+1,2)-
A(i+1,1)*A(i,2)));
end
GA(1)=GA(1)/(6*S(A));
GA(2)=GA(2)/(6*S(A));
end
```

Б.3 Скрипт IMAGE_SCRIPT.m для розрахунку та відображення ЦМ об'єкта на зображенні

```
I=rgb2gray(imread('ax.png'));
[N,M]=size(I);
sum=0;
Z=zeros(2,1);
X=0;
Y=0;
a=1;
b=1;
for i = 1:N
    for j = 1:M
        sum = sum + double(I(i,j));
        Y = Y + double(I(i,j))*(i*a + 1/2);
        X = X + double(I(i,j))*(j*b + 1/2);
    end
end
```

```

        end
    end
    Z(1) = X/sum;
    Z(2) = N - Y/sum;
    disp(Z);

```

Б.4 Скрипт CALIBRATE.m для корекції яскравості

```

A = [11566 19276 26986 34695 42405 50115 57825 65535];
B = [67 87 102 116 128 139 150 160];

C=zeros(1,length(B));
C(1)=0;
C(end)=255;
for i=2:length(B)
    C(i)=C(i-1)+(A(i)-A(i-1))/(A(end)-A(1))*C(end);
end

disp(C);

```